

ОБ ЭФФЕКТЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СЛОИСТЫЙ НЕФТЯНОЙ ПЛАСТ

В.Н. Федоров

*НИИММ Казанского государственного университета
wfn@ksu.ru*

Нефтяные пласты имеют сложное геологическое строение и весьма часто образованы слоями с различными физическими свойствами. Неоднородность пластов приводит к тому, что вода идет по наиболее высокопроницаемым слоям, оставляя невыработанными менее проницаемые прослои. В этом случае основным условием повышения эффективности эксплуатации продуктивных пластов становится значительное снижение проницаемости наиболее обводненных прослоев пласта. Это необходимо для того, чтобы направить закачиваемую воду в менее проницаемые малообводненные пропластки.

В нефтепромысловой практике используются методы, направленные на увеличение коэффициента вытеснения нефти водой и охвата пластов заводнением путем создания оторочек из химических реагентов повышенной вязкости или повышающих вязкость и вытесняющие свойства закачиваемой воды за счет сложного взаимодействия закачиваемого реагента с нефтью, пластовой водой и породой пласта [1]. Однако эти методы дороги в использовании. Возникает вопрос: нельзя ли с помощью циклического воздействия на пласт повысить эффективность его разработки?

Целью данной работы является изучение влияния циклического воздействия на процесс фильтрации и на основные характеристики разработки пласта с помощью вычислительных экспериментов. Процесс вытеснения нефти водой исследовался в рамках модели двухфазной фильтрации в крупномасштабном приближении [2] с учетом упругоёмкости поровой среды и жидкости. Модель описана системой дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка относительно давления и первого порядка относительно насыщенности [3]. Эту систему можно записать в виде

$$\operatorname{div} V = \beta \frac{\partial p}{\partial t}, \quad V = -k \cdot k^* \cdot \operatorname{grad} p, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} V_1 = s\beta_1 \frac{\partial p}{\partial t} + m \frac{\partial s}{\partial t}, \quad V_1 = f(s) \cdot V. \quad (2)$$

Здесь используются обозначения: V , V_1 - общий поток и поток воды, k - абсолютная проницаемость, $k^* = \mu \cdot k_w^* + k_n^*$ - относительная

подвижность, k_w^* , k_n^* - фазовые проницаемости воды и нефти, $\mu = \mu_w/\mu_n$, μ_w , μ_n - вязкость воды и нефти, $f(s) = k_w^*/(\mu_w \cdot k^*)$ - доля воды в потоке (функция Баклея-Левверетта), m - пористость, β , β_1^* , β_2^* - упругоэластичность поровой среды, воды и нефти соответственно, p - давление, s - водонасыщенность.

Относительные фазовые проницаемости k_w^* , k_n^* зависят от многих факторов. В условиях неоднородности пласта наибольшее влияние на них оказывает слоистость, а также насыщенность пористой среды вытесняющей фазой. Поэтому будем предполагать, как это обычно делается, что фазовые проницаемости k_i зависят только от насыщенности и терпят скачок на границах раздела пропластков. Их функциональную зависимость представляют или в виде таблиц, полученных по экспериментальным данным при стационарном движении смеси жидкостей, или в виде эмпирических формул. Следует отметить, что в этих зависимостях неявно учитываются капиллярные силы. Графики этих функций, полученные для разных пористых сред, хотя и различны, но имеют общий характер: вогнутость различной кривизны (в зависимости от пород) и существование двух предельных значений насыщенности s^* , s_* , ниже или выше которых соответствующие фазовые проницаемости обращаются в нуль.

Рассматривалась задача фильтрации в разрезе слоистого пласта с заданными начальными и граничными условиями. На начало разработки задается распределение полей насыщенности и давления. При этом на нагнетательной галерее задается периодическое воздействие $P_{x=0} = P_1 + A \cdot \sin(2\pi \cdot t/T)$ с фиксированной амплитудой A и периодом колебаний давления T . На добывающей галерее задается постоянное значение давления P_2 . Для добывающей галереи должно выполняться условие $P_1 - A \geq P_2$. Кровля и подошва считаются непроницаемыми. В силу того, что рассматривается неоднородный пласт, т.е. проницаемость представляет собой кусочно-непрерывную функцию, возникает необходимость задания условия сопряжения в точках разрыва проницаемости (на границах раздела пропластков): $p^+ = p^-$, $V^+ = V^-$, $V_1^+ = V_1^-$. Другими словами, на границе, разделяющей соседние пропластки, выполняются условия равенства давлений и непрерывности общего потока и потока воды. Из них следует, что при различиях в фазовых проницаемостях слоев возникает скачок насыщенности на границе раздела.

Задача решалась численным методом. Уравнение (1) использова-

лось для расчета поля давления, а уравнение (2) – для вычисления поля насыщенности. Насыщенность вычислялась по явной схеме. Для сходимости метода задавалось определенное направление обхода области. В силу того, что функция насыщенности изменяется быстрее, чем функция давления, пришлось прибегнуть к дополнительному дроблению шага для вычисления насыщенности.

Табл. 1

№ слоя	S.	S*	Нефтеотдача, %		Обводненность, %	
			стап.	нестап.	стап.	нестап.
1	0,2	0,8	38,8	45,5	24,6	28,8
2	0,01	0,99	77,1	75,5	98,6	98,2
3	0,2	0,8	56,9	58,4	95,2	96,1
общая			59	60,1	95,6	95,6

Табл. 2

Упругость			Нефтеотдача, %				Обводненность, %			
вода	нефть	среда	1	2	3	Общая	1	2	3	общая
1e-5	1e-4	1e-5	39,5	76,7	57	59,1	28,2	98,5	95,4	95,8
5e-5	5e-4	5e-5	42,7	75,7	57,7	59,9	39,2	98,3	95,8	96,1
1e-4	1e-3	1e-4	44,2	75,3	57,9	60,3	40	98,2	95,9	96
5e-4	5e-3	5e-4	47,5	76,9	60,6	62,8	32,2	98,2	96,2	95,8
1e-3	5e-3	1e-3	47,3	77,5	61,2	63,1	28,8	98,2	96,2	95,7
5e-3	1e-2	5e-3	51,2	84,5	68,4	69,2	31,5	98,5	96,8	96,1

Табл. 3

T, сут.	Нефтеотдача, %				Обводненность, %			
	1	2	3	Общая	1	2	3	общая
0,25	44,2	76	58,5	60,8	23,8	98,3	95,9	95,5
0,5	45	75,7	58,5	60,9	25,5	98,3	96	95,5
1	45,5	75,5	58,4	61	28,8	98,2	96,1	95,6
2	45,6	75,3	58,3	60,9	33,7	98,2	96,1	95,8
4	45,3	75,4	58,3	60,8	37,7	98,1	96	95,9
8	44,2	75,3	57,9	60,3	40	98,2	95,9	96
16	42,5	75,5	57,4	59,7	39,4	98,3	95,8	96,1
32	40,6	75,9	56,8	59,1	34,9	98,4	95,7	96

Разработана соответствующая программа, позволяющая для заданных исходных данных рассчитать основные характеристики разработки пласта и графически изобразить процесс фильтрации во времени.

Проведены многочисленные вычислительные эксперименты для изучения влияния упругости поровой среды и жидкости, фазовых проницаемостей, периода и амплитуды циклического воздействия на основные характеристики вытеснения. Результаты экспериментов приведены в таблице 1 (для фазовых проницаемостей), в таблице 2

(для упругоемкости) и в таблице 3 (для периода колебаний давления) на момент времени, соответствующий закачке двух поровых объемов. Рассматривался трехслойный пласт. Абсолютная проницаемость пропластков бралась различной: 0.1, 1, 0.5 дарси соответственно. Фазовые проницаемости задавались в соответствии с S_0 и S^* из таблицы 1 (обозначения: стац. – стационарный режим, нестац. – нестационарный).

Анализ полученных результатов показал, что эффект выравнивания насыщенности в пропластках зависит от периодического воздействия только лишь в том случае, когда фазовые проницаемости в слоях различаются. При этом наибольший эффект проявляется не только при различиях в связанной и предельной водонасыщенностях, но и в самом виде зависимости фазовой проницаемости от насыщенности. Эффект заключается в том, что граница раздела двух пропластков с различными фазовыми проницаемостями начинает вести себя как "клапан". Другими словами, выделяется приоритетное направление перетока воды. Это связано с тем, что скорость перетока воды напрямую связана с долей воды в потоке (функция Баклея-Лeverетта). И, соответственно, для какого пропластка эта функция больше, туда и происходит дополнительный переток воды.

Результаты показали, что все три величины упругоемкости (воды, нефти, среды) оказывают влияние на дополнительный переток воды в слабопроницаемые слои. И можно утверждать, что с увеличением упругоемкости растет нефтеотдача и происходит выравнивание насыщенности. Получено также оптимальное значение для периода циклического воздействия ($T = 0.5 - 1$ сутки), при котором эффект выравнивания насыщенности максимален.

Таким образом, можно сделать вывод, что в определенных условиях происходит выравнивание выработки и повышение нефтеотдачи пласта при циклическом воздействии.

ЛИТЕАТУРА

1. Чекалин А.Н., Кудрявцев Г.В., Михайлов В.В. *Исследование двух- и трехкомпонентной фильтрации в нефтяных пластах*. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1990. – 148 с.
2. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. *Движение жидкостей и газов в природных пластах*. – М.: Недра, 1984. – 211 с.
3. Булыгин В.Я. *Гидромеханика нефтяного пласта*. – М.: Недра, 1974. – 230 с.
4. Чекалин А.Н. *Численные решения задач фильтрации в водо-нефтяных пластах*. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1982. – 208 с.